

AEと破壊力学による疲労破壊の一研究

(材料の有効利用を目的とした疲労破壊のAE測定の基礎的研究, 第二報)

A Study on Fatigue Crack Growth by AE and Fracture Mechanics (A Basic Study on Measurements of Fatigue Crack by Acoustic Emission for the Efficient Use of Materials: The Second Report)

鳥飼 安生*・北川 英夫*・尾上 守夫**・結城 良治*

Yasuo TORIKAI, Hideo KITAGAWA, Morio ONOE, Ryoji YUUKI,

大平 壽昭*・方 時桓*・山田 博章**・李 孝雄*

Toshiaki OHIRA, Si Hwan BANG, Hiroaki YAMADA and Hyo Ung LI

1. 序 言

省資源のための材料の有効利用は現在のわれわれの重要な努力目標の一つとなっていて、各種の側面からのアプローチが試みられている。その一つは、従来廃棄されていた材料を利用し、複合・変成等を経て、一見新しい材料として使う場合で、生産廃棄物や生活廃棄物を素材の一部に使った建材の利用等がそれである。他の側面には、既に長期間使用してきた機器・構造物の材料を、安全性・信頼性等の要求も満たしながら監視しつつ、できる限り長期間使用する努力がある。

上記のような意味での材料の有効利用に当たっては、材料の強度評価ないし信頼性評価が必要となるが、その有力な手法の一つがAEによる監視と破壊力学による解析との組合わせであろう。すなわち、供用中の材料の局部破壊の程度・位置ないし、破壊の進行速度に関する情報をAE信号の解析によって得ると同時に、一方この破壊を広義のき裂挙動と解釈し、き裂モデルを用いて力学的に解析する。もし、き裂挙動とAE情報の間に一定の関係が得られれば、目的が達せられる道が開ける。AEが一種の非破壊検査とも言われるゆえんの一つである。

現在、われわれは上記の各種の側面からの材料の有効利用に対してAEの利用の検討を行っており、この種材料で問題となるぜい性破壊と疲労破壊とを主対象として研究を行っているが、まず疲労破壊から述べる。前回¹⁾は疲労き裂の成長に関するAE計測と、得られたAE情報について報告した。今回は、その破壊力学的解釈について述べる。

2. 実験方法

AE活性度があまり高くない汎用の60 kg/mm²級溶接構造用圧延鋼(WELTEN 60)と、これと比較のため、塑性変形に対するAE活性度の高いAl-Mg合金(5052-H 24)2種を供試材とし、片側予き裂入り平板試験片に

* 東京大学生産技術研究所 第1部

** 東京大学生産技術研究所 第3部

10ないし15Hzで片振れ引張り繰返し荷重をかけて疲労き裂成長実験を行い、疲労き裂成長挙動の連続的測定および2チャンネルのAE標定装置(DUNEGAN/END EVCO社3000 Series)を用いてのAE信号の計測を行った。実験方法・装置の詳細は前報¹⁾に述べたとおりである。

3. $\Delta K \sim da/dn \sim dN/dn$ 図による整理

前報¹⁾では、疲労き裂成長時のAE事象の累積数Nとき裂長さaとの関係、AEの発生時刻と荷重位相との関係およびAEの振幅分布について報告したが、本報では主としてAE計数率 dN/dn と疲労き裂成長速度 da/dn および破壊力学パラメータである応力拡大係数範囲 ΔK との関係について調べた結果について述べる。nは荷重繰返し回数である。

Fig. 1(a)にWELTEN 60鋼の $\Delta K \sim da/dn$ 関係と $\Delta K \sim dN/dn$ 関係を共通の座標を用いて合わせて示す。この図は荷重レベル、初期き裂長の異なる実験の結果をまとめて示したものであるが、よく知られているように $\Delta K \sim da/dn$ のほとんどのデータは両対数図上で狭い直線状分散帯に入っている。図から分かるように $\Delta K \sim dN/dn$ 関係の多くのデータも上記の $\Delta K \sim da/dn$ 分散帯とはほぼ平行な若干広い直線状分散帯に収まる。各試験片ごとの左端のデータが下方に流れているのは安定成長までの遷移現象かとも思われる。両分散帯の縦座標の比は約30で、これは $dN/da = (dN/dn)/(da/dn)$ が一定であり、き裂成長速度の大小にかかわらず、き裂が1mm成長するごとに約30回のAEが発生することを意味する。これはきわめて注目すべき結果であり、従来、1回の荷重繰返しごとに1本のストライエーションを形成しつつ成長する疲労き裂進展機構と対応させて考えられることの多かったAEの発生とは、異なった発生機構によるAEで、き裂進行距離依存のAE発生回数が計測されたこととなる。

また、上記の dN/dn データがすべて1以下で大部分

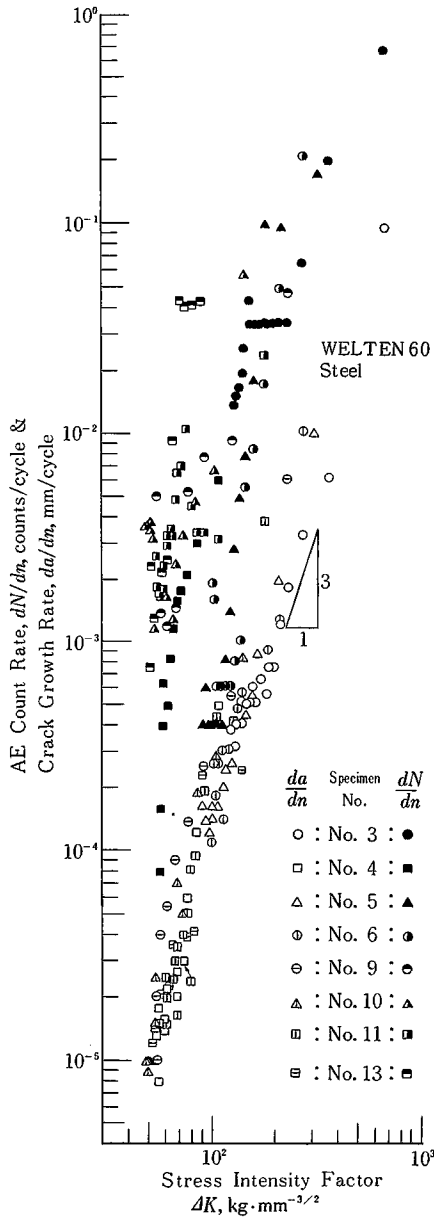


Fig. 1(a) Stress Intensity Factor Range (ΔK) - Fatigue Crack Growth Rate (da/dn) and AE Count Rate (dN/dn) Diagram of WELTEN 60 Steel

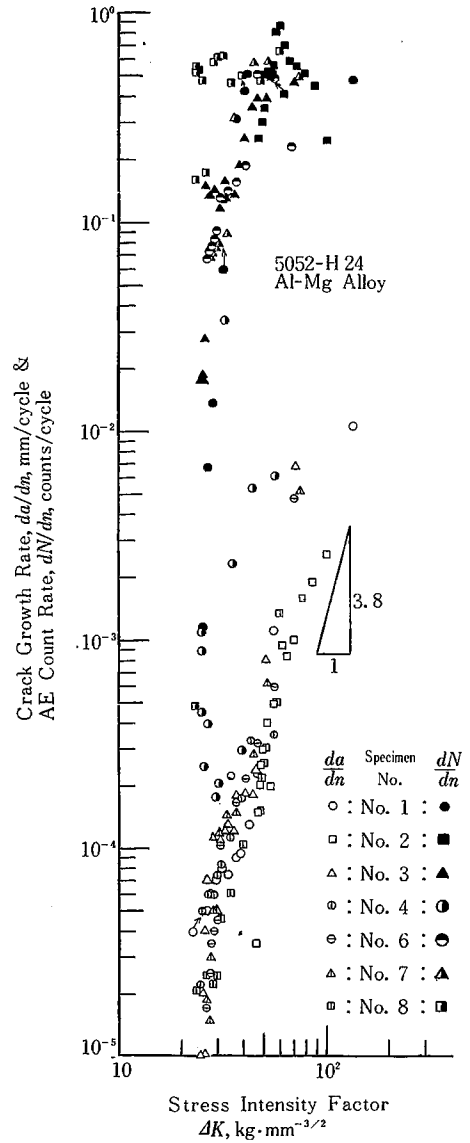


Fig. 1 (b) Stress Intensity Factor Range (ΔK) - Fatigue Crack Growth Rate (da/dn) and AE Count Rate (dN/dn) Diagram of Al-Mg Alloy 5052-H 24

のデータが 10^{-3} と 2×10^{-1} の間にあることも応用上重要で、これは荷重が 5~1000 回かかって初めて 1 回の AE が計測されたことになり、少なくともこの計測方法では、低速の荷重繰返しを受ける材料の監視には、長時間の見落しのない計測を必要とすることになる。

次に Al-Mg 合金についても同様に $\Delta K \sim da/dn$, $\Delta K \sim dN/dn$ 関係を 1 枚の図で同時に示したのが Fig. 1

(b)である。一般的傾向は WELTEN 60 鋼と類似し、 $\Delta K \sim da/dn$ データは同じく直線状分散帯を形成する。しかし WELTEN 60 鋼との間には次のような著しい差異が見られる。1) $\Delta K \sim dN/dn$ 関係には、部分的には $\Delta K \sim da/dn$ 関係と平行な領域があるが、高 dN/dn 領域では飽和傾向が見られ、 $dN/dn=1$ の近傍に飽和点があるように見られる。2) dN/dn と da/dn 両分散帯の縦

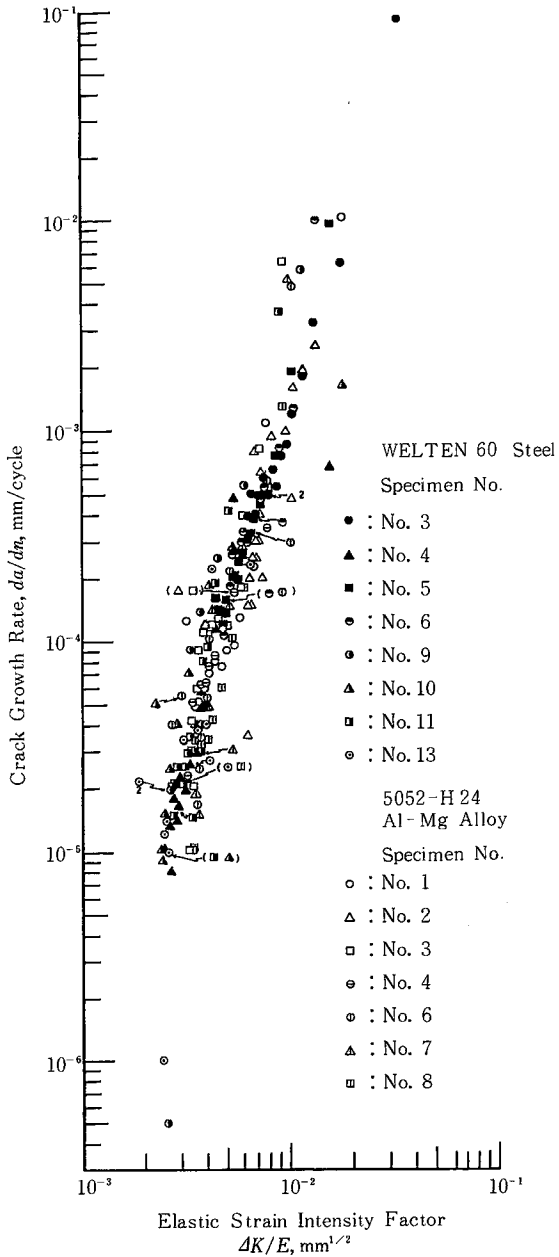


Fig. 2(a) Unificated Expression of Fatigue Crack Growth Rate (da/dn) of Steel and Al-Mg Alloy by Elastic Strain Intensity Factor Range ($\Delta K/E$)

座標の比は WELTEN 60 鋼に比べると著しく高く、Al-Mg 合金では、き裂が 1mm 成長するごとに約 1000 回の AE が発生することになり、WELTEN 60 鋼での実験の約 1/3 の ΔK レベルでのき裂進行であったことを考えると、この材料はきわめて AE 活性度が高いことがわかる。しかし飽和域では上記の 1 mm 当たりの N は 1000 回より低下し、50 回程度まで下がることもある。なお Fig.

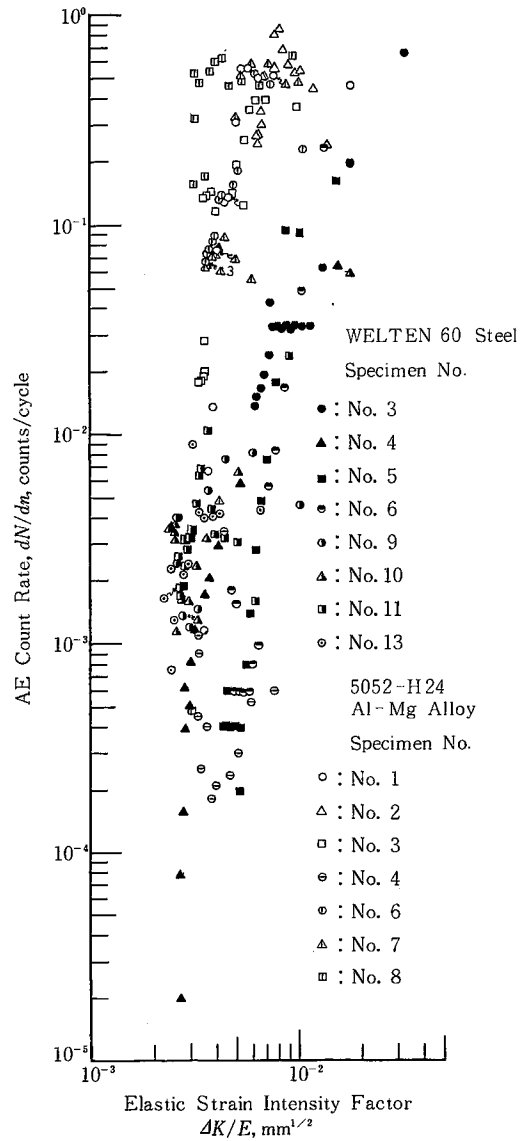


Fig. 2(b) Comparison of AE Count Rate (dN/dn) of Steel and Al-Mg Alloy by Unificated Parameter, Elastic Strain Intensity Factor Range ($\Delta K/E$)

1 (b) 中の No. 1 と No. 4 は特別に熱処理した材料のデータであり、 $\Delta K \sim da/dn$ 特性は他の試験片と同じ特性を示したが、 $\Delta K \sim dN/dn$ 特性はかなり異なり、材料の熱処理に対し、き裂成長速度は鈍感でも AE の方は影響を受けやすいことがありうることを意味する。

次に両材料の疲労き裂成長速度データを弾性ひずみ拡大係数範囲 $\Delta K/E$ で整理し、Fig. 2 (a) に示す。図から

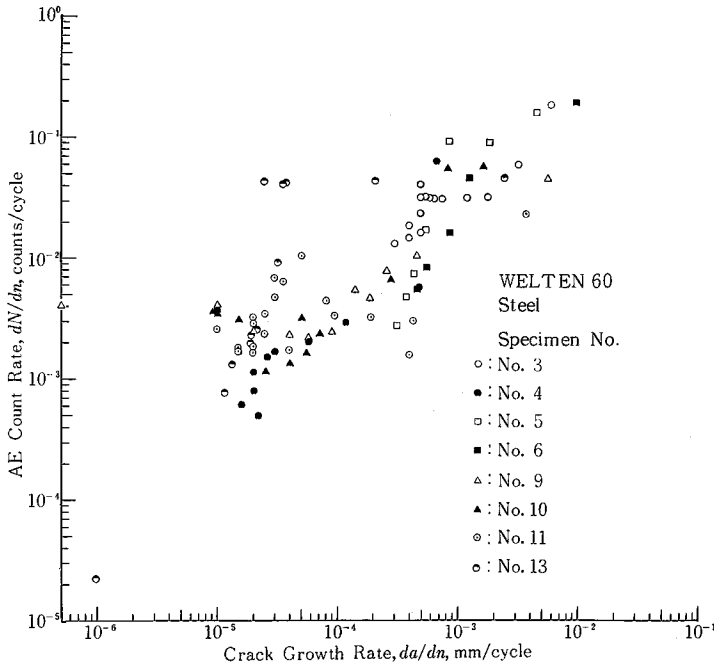


Fig. 3(a) Relation between Fatigue Crack Growth Rate (da/dn) and AE Count Rate (dN/dn) of WELTEN 60 Steel

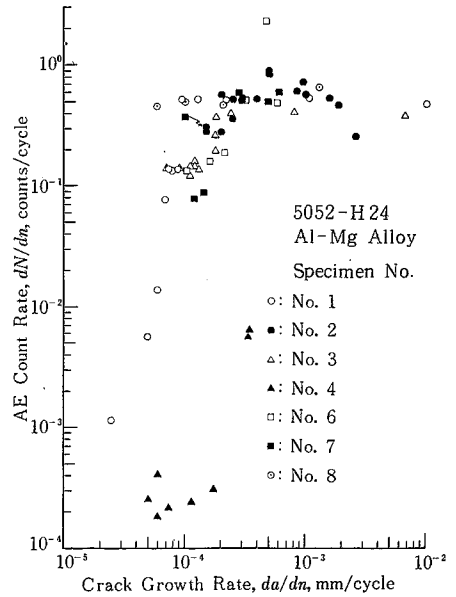


Fig. 3(b) Relation between Fatigue Crack Growth Rate (da/dn) and AE Count Rate (dN/dn) of Al-Mg Alloy 5052-H 24

分かるように、両材料のデータの大部分は一本の線に集まってくる。したがって、Fig. 2 (b) に示すように、 dN/dn を $\Delta K/E$ で整理することは、材料の差に無関係にき裂成長速度でAE計数率を整理することと等価であると考えられる。Fig. 2 (b)は当然のことながら、同じ $\Delta K/E$ 値に対して、Al-Mg合金では、WELTEN 60鋼に比べて、AE計数率が高いことが示されている。

4. $da/dn \sim dN/dn$ 図による整理

Fig. 1 (a), (b)に示した $\Delta K \sim da/dn \sim dN/dn$ 図では、Al-Mg合金のデータでは、 da/dn と dN/dn の両データの平行性が必ずしも明瞭でない。そこで ΔK を仲介しないで da/dn と dN/dn を直接関係づけたのが、Fig. 3 (a)とFig. 3 (b)である。Fig. 3 (a)のWELTEN 60鋼では遷移特性と見なされるデータを除いてプロットすると、データ全体としては傾きが 45° に近い分散帯に沿っており、バラツキは少なくないが、 da/dn と dN/dn の間には直線関係が近似的に存在するようである。

同様な図をAl-Mg合金について示したのがFig. 3 (b)である。特殊熱処理材のNo. 1, No. 4のデータと遷移域データを除いてもなお 45° に近い分散帯とは考えにくい。

5. $\Delta K \sim da/dn \sim dN/dn$ 特性, $da/dn \sim dN/dn$ 特性, $a \sim N$ 特性間の関係

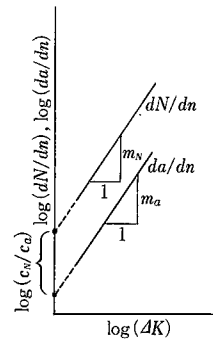


Fig. 4 Schematic Representation of Linear Portions of the $\Delta K \sim da/dn \sim dN/dn$ Relation

上記のように、 45° の直線状分散帯 (Fig.3)ないし平行状分散帯 (Fig.1)とは考えにくい場合も含めて、この $da/dn \sim dN/dn$ 図と $\Delta K \sim da/dn \sim dN/dn$ 図および $a \sim N$ 図の関係を次に検討する。

Fig. 1 (a)等またはこれを模式化したFig. 4から

$$dN/dn = C_N \cdot (\Delta K)^{m_N} \tag{1}$$

$$da/dn = C_a \cdot (\Delta K)^{m_a} \tag{2}$$

ここで、 C_N, m_N, C_a, m_a は定数であり、 m_a はWELTEN 60鋼では約3, 5052-H 24 Al-Mg合金では約3.8と得られた。 $\Delta K \sim da/dn \sim dN/dn$ 図で近似的平行性が得られる領域では、

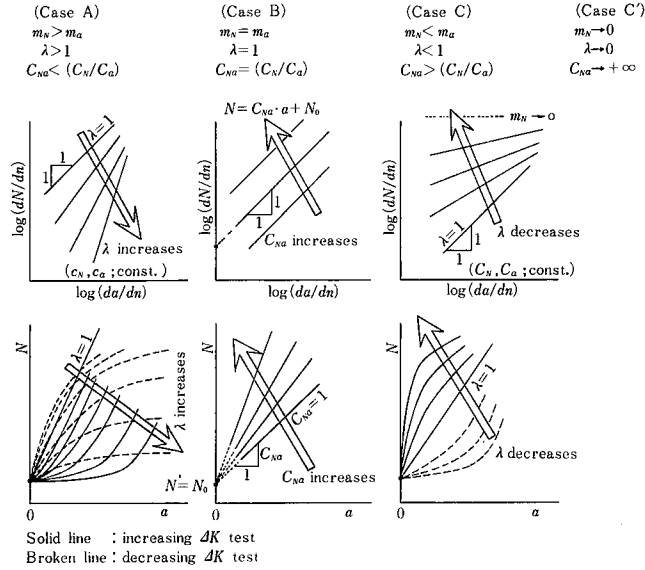


Fig. 5 Schematic Representation of the Variation of the da/dn vs. dN/dn and a vs. N Diagrams as a Function of the Values of $\lambda (= m_N/m_a)$

$$m_N = m_a = m \text{ (定数)} \quad (3)$$

なので、式 (1), (2) から、

$$dN/da = (dN/dn)/(da/dn) = C_N/C_a \text{ (定数)} \quad (4)$$

既述のように C_N/C_a は WELTEN 60 鋼で 30, 5052 Al-Mg 合金で約 1000 と得られた。

$m_N \approx m_a$ の領域では、

$$m_N = \lambda \cdot m_a \text{ あるいは } m_N/m_a = \lambda \quad (5)$$

とおけば、この λ の値を近似的に定数と見なせる各範囲について、それぞれの λ 値に対して、

$$dN/da = (C_N/C_a)(\Delta K)^{m_a(\lambda-1)} \quad (6)$$

となり、 ΔK 依存性または a 依存性が現れる。また、

$$dN/dn = (C_N/C_a^{\lambda}) \cdot (da/dn)^{\lambda} \quad (7)$$

$$\text{ただし、} C_{Na} = C_N/C_a^{\lambda} \quad (8)$$

となり、 $da/dn \sim dN/dn$ 図の傾きや位置、すなわち、き裂成長速度と A E 計数率との関係が、したがってまた、 $a \sim N$ 関係も、 $m_N/m_a (= \lambda)$ に強く影響されること、およびその影響の傾向が分かる。このことは、今回提案した $\Delta K \sim da/dn \sim dN/dn$ による整理方法の有用性を示している。この図を経ないで直接 $da/dn \sim dN/dn$ を使うと遷移データの選別が困難であろう。この m_N と m_a の関係すなわち λ の各種の値に対し、 $da/dn \sim dN/dn$ 関係や a

$\sim N$ 関係がどのように変わるか、その傾向のみを Fig. 5 の模式図に例示する。

6. ま と め

A E 活性度があまり高くない汎用の溶接構造用鋼 WELTEN 60 と、比較的 A E 活性度の高い Al-Mg 合金 5052-H 24 について、いわゆる高サイクル疲労試験を行ない、疲労き裂成長に伴う A E count の破壊力学的解析を行った。主なる結論は次のごとくである。

1) WELTEN 60 鋼では、両対数グラフ上で A E 計数率 dN/dn は ΔK に対し直線で、かつ、き裂成長速度 da/dn の $\Delta K \sim da/dn$ 直線とほぼ平行である。すなわち、この鋼のこの測定領域では、き裂成長速度や ΔK に無関係に、き裂成長距離 1 mm に平均約 30 回の A E が計数されていることになりき裂成長距離依存性が高い。

2) 今回試験した Al-Mg 合金 5052-H 24 では、A E 計数率 dN/dn の da/dn に対する比がきわめて高く、最大 1000 倍にも達する。また、き裂成長の比較的初期に dN/dn の増加は飽和し、き裂成長速度や ΔK が変わってもほぼ一定ないし微増を続ける。

3) 今回計測した A E 計数率 dN/dn は常に 1 より低かった。すなわち、顕著な A E の発生は、毎回の荷重繰返しごとにはなく、休止期をはさんで、断続的に発生する。その休止期は時に数 1000 回の荷重繰返しに及ぶこともある。

4) 今回提案した $\Delta K \sim da/dn \sim dN/dn$ 図による A E データ整理方法は、 $dN/dn \sim da/dn$ 関係や $a \sim N$ 関係の推定、その他の情報を得る上で有用であろう。

7. 謝 辞

この研究にご協力いただいた山腰綱吉氏に対し、謝意を表したい。
(1980年1月21日受理)

参 考 文 献

- 1) 鳥飼・北川・尾上・李・大平・山田; 生産研究, Vol. 31, No. 3 (1979) p. 208

☆ 筆 者 紹 介 ☆

- | | |
|--|--|
| ◇田中 尚 (Hisashi TANAKA) 教授(所長)工博
専攻・建築構造学 | ◇白石 振作 (Shinsaku SHIRAIISHI) 助教授 工博 専攻・有機合成化学 |
| ◇今岡 稔 (Minoru IMAOKA) 教授 工博 専攻・複合材料工学, 無機工業化学 | ◇木内 学 (Manabu KIUCHI) 助教授 工博 専攻・塑性加工学 |
| ◇小林 一輔 (Kazusuke KOBAYASHI) 教授 工博 専攻・コンクリート工学, 複合材料工学 | ◇長田 和雄 (Kazuo NAGATA) 助手(特別研究員) 工博 専攻・金属材料学 |
| ◇魚本 健人 (Taketo UOMOTO) 助手 専攻・コンクリート工学 | ◇梅津 清 (Kiyoshi UMEZU) 技官 専攻・同上 |
| ◇妹尾 学 (Manabu SENŌ) 教授 理博 専攻・有機工業化学 | ◇西川 精一 (Seiichi NISHIKAWA) 教授 工博 専攻・同上 |
| ◇金子 秀昭 (Hideaki KANEKO) 元受託研究員 日本ペーカラージング株式会社 専攻・同上 | ◇七尾 進 (Susumu NANAŌ) 助手(特別研究員) 工博 専攻・同上 |
| ◇三木五三郎 (Gosaburo MIKI) 教授 工博 専攻・地質工学 | ◇松崎 明博 (Akihiro MATSUZAKI) 大学院学生 専攻・同上 |
| ◇五十嵐 仁 (Hitoshi IGARASHI) 大学院学生 専攻・同上 | ◇徳満 和人 (Kazuto TOKUMITSU) 大学院学生 専攻・同上 |
| ◇龍崎 文夫 (Fumio TATSUOKA) 助教授 工博 専攻・同上 | ◇井野 博満 (Hiromitsu INO) 助教授 工博 専攻・同上 |
| ◇増子 昇 (Noboru MASUKO) 教授 工博 専攻・複合金属材料工学 | ◇鈴木 清 (Kiyoshi SUZUKI) 助手 専攻・材料加工学 |
| ◇原 善四郎 (Zenshiro HARA) 助教授 工博 専攻・金属加工学 | ◇小山 浩幸 (Hiroyuki KOYAMA) 研究生(芝浦工業大学) 専攻・同上 |
| ◇石田 洋一 (Yoichi ISHIDA) 助教授 工博 Ph.D 専攻・金属物性工学 | ◇川井 忠彦 (Tadahiko KAWAI) 教授 工博 専攻・船体構造力学, 数値解析 |
| ◇井上 健 (Takeshi INOUE) 助手 専攻・放射性同位元素工学 | ◇山田 嘉昭 (Yoshiaki YAMADA) 教授 工博 専攻・固体材料強度学 |
| ◇鈴木 基之 (Motoyuki SUZUKI) 助教授 工博 専攻・環境化学工学 | ◇奥村 秀人 (Hidehito OKUMURA) 助手 専攻・同上 |
| ◇藤井 隆夫 (Takao FUJII) 技官 専攻・同上 | ◇吉永 寛 (Hiroshi YOSHINAGA) 受託研究員 住友ゴム工業株式会社 専攻・複合材料工学 |
| ◇鋤柄 光則 (Mitsunori SUKIGARA) 助教授 工博 専攻・工業物理化学 | ◇黄 佑民 (You-min HUANG) 大学院学生 専攻・材料力学 |
| ◇大蔵 明光 (Akimitsu OKURA) 助教授 工博 専攻・複合材料工学 | ◇西口 磯春 (Isoharu NISHIGUCHI) 大学院学生 専攻・同上 |
| ◇中川 威雄 (Takeo NAKAGAWA) 教授 工博 専攻・材料加工学 | ◇山口 楠雄 (Kusuo YAMAGUCHI) 教授 工博 専攻・電気制御工学 |
| ◇天野 富男 (Tomio AMANO) 研究員(職業訓練大学校助教授) 工博 専攻・同上 | ◇鳥飼 安生 (Yasuo TORIKAI) 教授 理博 専攻・超音波工学 |
| ◇浜井 達郎 (Tatsuro HAMAI) 株式会社浜井製作所 専攻・同上 | ◇北川 英夫 (Hideo KITAGAWA) 教授 工博 専攻・材料強度機構学 |
| ◇田中 孝 (Takashi TANAKA) 協和合金株式会社 専攻・同上 | ◇尾上 守夫 (Morio ONOE) 教授 工博 専攻・応用電子工学 |
| ◇藏 豊樹 (Feng-Shuh DAI) 大学院学生 専攻・同上 | ◇結城 良治 (Ryoji YUUKI) 講師 工博 専攻・材料強度機構学 |
| ◇増沢 隆久 (Takahisa MASUZAWA) 助教授 工博 専攻・精密工作学 | ◇大平 壽昭 (Toshiaki OHIRA) 助手 専攻・同上 |
| ◇坪井 邦夫 (Kunio TSUBOI) 研究員(東京商船大学助教授) 工博 専攻・制御工学, パワーエレクトロニクス | ◇方 時桓 (Si Hwan BANG) 客員研究員(韓国崇田大学教授) 専攻・同上 |
| ◇楢垣 成敏 (Shigetoshi HIGAKI) 大学院学生 専攻・電気工学 | ◇山田 博章 (Hiroaki YAMADA) 助手 専攻・応用電子工学 |
| ◇原島 文雄 (Fumio HARASHIMA) 助教授 工博 専攻 | ◇李 孝雄 (Hyo Ung LI) 技官 専攻・超音波工学 |